

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.007

2022年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对

郝增超, 张璇, 郝芳华, 付永硕

(北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:基于ERA5月尺度数据,分别计算干旱指标(SPI)和高温指标(STI),从复合型极端事件的角度分析了长江流域2022年夏季复合高温干旱事件及影响。研究表明:该事件是长江流域1979年以来覆盖范围最广的复合高温干旱事件,导致水资源供给减少,影响农业生产及民众健康,同时导致电力供需失衡,增加森林火灾风险;未来应在复合高温干旱事件的发生机制、联合监测和预测、影响评估、联合调度及适应性措施等方面加强研究。

关键词:干旱;高温;复合型极端事件;气候变化;长江流域

中图分类号:P338⁺.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0046-07

Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin//HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, FU Yongshuo (*College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: Based on monthly data from ERA5, this paper analyzed the droughts (Standardized Precipitation Index, SPI) and hot extremes (Standardized Temperature Index, STI) during the summer of 2022 in the Yangtze River Basin and its effects from the perspective of compound extremes. The results show that this event in the Yangtze River Basin affected the largest area since 1979, reducing water supply, affecting agricultural production and public health, leading to the imbalance of power supply and demand, and increasing the risk of forest fire. In the future, it is necessary to strengthen research on compound hot extremes and droughts from multiple aspects, including the physical mechanisms, joint monitoring and prediction, impact assessment, joint dispatching, and adaptation measures.

Key words: drought; hot extreme; compound extremes; climate change; the Yangtze River Basin

两个(或多个)极端事件同时或者相继发生的事件一般称为复合型极端事件,会给生态系统、社会经济等带来巨大影响,最新的IPCC AR6报告中强调了需要加强对复合型极端事件的研究^[1-2]。2022年6月,由生态环境部等17部门联合印发的《国家适应气候变化战略2035》指出,需要发展复合型灾害预测预警技术。复合高温干旱事件是一种典型的复合型极端事件,由于其强致灾性往往导致严重的复合型灾害。高温(或者热浪)事件是指某地一段时间内温度超过阈值的事件,干旱(包括气象干旱、农业干旱、水文干旱及社会经济干旱等类型)是指一段时期内由于水分收支不平衡导致的水分短缺现象,而当高温和干旱事件同时发生(即复合高温干旱事件)时,由于灾害的叠加效应,对生态系统及社

会经济各部门的影响可能比单一事件影响更大^[3-5]。因此,有必要加强复合高温干旱事件及其对自然与社会经济系统影响的研究。

近年来全球多地复合高温干旱事件频发,导致了社会经济的巨大损失。许多学者通过统计学及物理模型方法量化了复合高温干旱事件对水资源、农业以及生态系统的影响^[4-7]。Ribeiro等^[8]基于联合分布模型比较了单一干旱与复合高温干旱对西班牙作物产量的影响,发现与中度干旱相比,复合高温干旱条件下作物损失的概率增加了8%~11%。中国是复合高温干旱事件的脆弱区,区域内复合高温干旱事件呈现频率升高、强度增加以及覆盖面积扩大等特点^[9-10]。虽然目前对我国复合高温干旱事件的变化及驱动因素研究相对较多^[11],但是关于此

基金项目:国家自然科学基金项目(42271024)

作者简介:郝增超(1982—),男,教授,博士,主要从事干旱与复合型极端事件研究。E-mail:haozc@bnu.edu.cn

通信作者:张璇(1984—),女,副教授,博士,主要从事流域水环境管理研究。E-mail:xuan@bnu.edu.cn

类事件对不同部门的影响以及适应性对策研究相对较少。

2022 年夏季长江流域发生了一次典型的复合高温干旱事件,该事件强度高、持续时间长、影响范围广,多地河道流量达到有观测记录以来的最低记录,鄱阳湖等湖泊面积急剧下降,与此同时,川渝等地出现 40℃ 以上极端高温天气,对水利、农业等部门造成了严重影响^[12]。此次复合高温干旱事件与环流异常有密切的关系,受持续拉尼娜事件的影响,与常年同期相比,2022 年夏季西太平洋副热带高压强度更强、位置偏西偏北、持续时间长、控制范围广,受下沉气流控制,长江全流域出现持续高温少雨天气^[13-15],形成并发的高温 and 干旱事件。本文从复合型极端事件的角度对该事件特点及影响作初步分析,并提出应对措施和建议,旨在为长江流域有效应对气候变化下的复合型极端事件提供参考。

1 研究数据与研究方法

长江流域总面积达 180 万 km²,流域年平均降水量从上游到中下游递增,径流主要由降雨形成,流域水系发达。长江流域水能资源丰富,是我国主要的水电开发基地,干流有葛洲坝、三峡、向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等巨型梯级水电站。流域大部分地区属于亚热带季风气候,是我国主要的粮食生产基地,大部分耕地分布于四川盆地和长江中下游地区。

1.1 研究数据

本文采用的 1979—2022 年逐月降水和气温数据来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的第五代大气再分析数据集 (ERA5) (<https://cds.climate.copernicus.eu/>),分辨率为 0.25° × 0.25°。该数据集具有时空分辨率高、参数多、更新快等优点^[16]。2022 年 7—8 月长江流域高温干旱较为严重^[17],干旱影响逐步累积,造成河流断流、发电量减少等影响。本研究重点研究盛夏 (7—8 月) 期间的复合高温干旱事件。

1.2 研究方法

对于气象干旱,本文选取标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 作为干旱指数^[18-19],基于 7—8 月累积降水数据计算干旱指数,其中累积分布函数采用非参数化的 Gringorten 经验频率公式计算。SPI 可以采用不同的阈值定义干旱,本文采用 -1.3 作为阈值定义极端干旱 (对应的累积降水百分位约为 10%)。对标准化温度指数 (standardized temperature index, STI) 采用同样方法

计算,用于表征高温情势。本文复合高温干旱事件定义为某一时段内高温和干旱同时发生的事件 (即 SPI 小于某一阈值,同时 STI 大于某一阈值)。对于复合高温干旱事件的强度,采用 7—8 月累积降水 (P) 和温度 (T) 百分位数的组合作为阈值 (P50/T50、P40/T60、P30/T70、P20/T80、P10/T90),定义了 5 个强度等级,其中当降水小于 P10 和温度高于 T90 同时发生时定义为最高强度等级^[20] (其对应的 SPI 和 STI 的值分别为 -1.3 和 1.3)。

2 复合高温干旱的空间分布特点

历史上长江流域也发生过多次大旱,包括 2006 年、2011 年、2013 年和 2019 年等^[21-23],而长江流域 2022 年夏季极端干旱的特点是持续时间长、影响范围广^[24],同时叠加持续性极端高温^[17]。2006 年、2011 年、2013 年、2019 年和 2022 年 5 次事件的干旱、高温以及复合高温干旱的空间监测图见图 1。从不同极端事件的空间分布来看,5 次干旱事件覆盖面积较大,但是 2011 和 2019 年的高温覆盖面积相对较小。2006 年、2013 年和 2022 年的干旱事件均伴随着高温,复合高温干旱事件的覆盖面积较大,其中 2022 年的覆盖面积最大。2022 年的旱情覆盖了长江流域的上游、中游和下游的大部分地区,且流域大部分区域高温均相对明显,这些结果体现了 2022 年 7—8 月复合高温干旱事件覆盖面积广的特点。

3 复合高温干旱事件的影响

3.1 水资源安全

气象干旱向农业干旱和水文干旱传递过程中,降水减少引发气象干旱,土壤含水量降低 (缺墒),河道流量减少,湖库及地下水水位下降,最终导致水资源供给短缺,影响工业、农业及生活用水^[25-27]。同时,极端高温加速蒸散发进而进一步加剧了农业干旱和水文干旱的程度。具体来说,夏季高温热浪事件常伴随着大气蒸发需求增加,导致土壤水分减少,水面蒸发增加,从而使汇入河流及湖泊的水量减少,形成严重的水文干旱^[28]。在干旱与高温同时发生期间,这两个过程叠加使水资源极度短缺,严重威胁水安全保障。

夏季一般是长江流域的汛期,降水多、河道流量大,但是长江流域 2022 年夏季降水减少且伴随着持续高温,来水量大幅减少同时蒸发量增加,导致进入主汛期后众多河流湖库水位偏低,出现了“汛期反枯”现象。至 2022 年 8 月中旬,长江干支流来水量较常年同期大幅减少,部分电站或水库水位跌至接

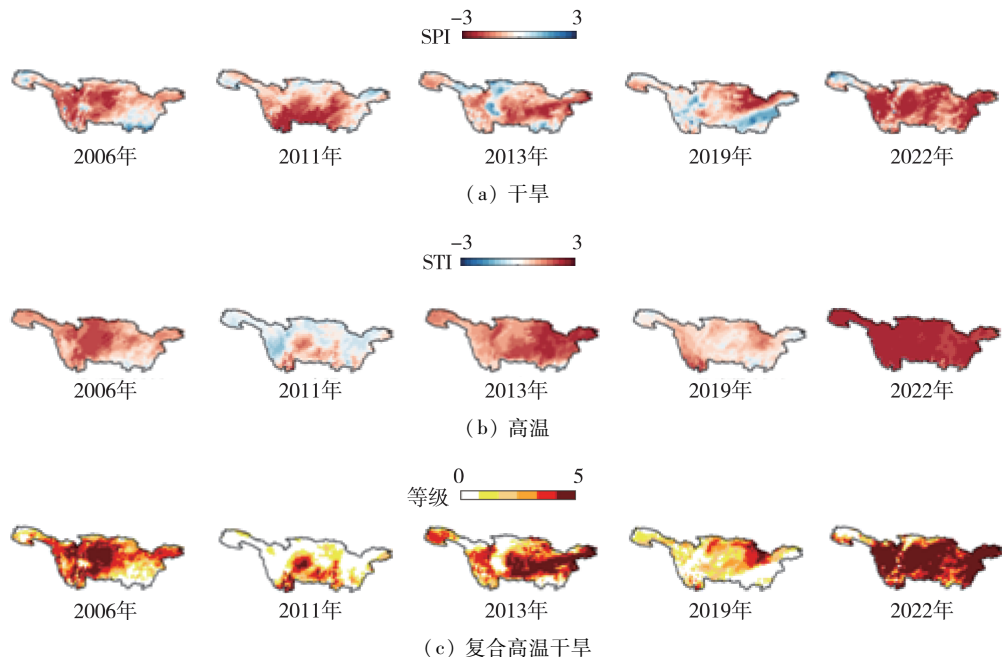


图1 长江流域2006、2011、2013、2019和2022年夏季干旱、高温和复合高温干旱监测
Fig.1 Monitoring of droughts, hot extremes, and hot droughts during summers of 2006, 2011, 2013, 2019, and 2022 in the Yangtze River Basin

近“死水位”，我国最大的两个淡水湖鄱阳湖和洞庭湖提前进入枯水期。以鄱阳湖为例，与2021年同期（2021年8月8日）相比，2022年8月11日鄱阳湖的湖面面积大幅减少。由于水资源减少，一些水源供水困难，导致部分地区城乡居民生活用水及牲畜饮水困难。

3.2 粮食生产

干旱发展一般较慢，其影响逐步累积，对生态系统或者作物的影响很大。干旱期间，植被气孔关闭以减少蒸发水分损失，导致光合作用减缓及生长期缩短，作物产量下降^[29]。高温同样对作物带来负面影响，其直接影响包括灼伤植物果实和叶片，抑制植物光合作用等，同时蒸发增加，加重了干旱情势，对作物生长产生负面影响^[30]。当干旱叠加极端高温时，对农业产量（特别是雨养农业）的影响可能更为严重^[6,31]。

受2022年高温干旱事件影响，流域大部分地区植被净初级生产力比常年同期偏低^[32]。据统计资料，长江流域耕地受旱面积达442万 hm^2 ^[33]，高温热害和干旱叠加给秋粮生产带来严峻挑战，影响秋粮作物生长及产量。

3.3 健康风险

严重干旱期间，一些地区可能缺乏符合卫生标准的饮用水，对人体健康产生影响；同时，持续高温热浪可能严重损害人体健康。高温热浪可能导致中暑等疾病，还可能导致血管、呼吸系统等疾病发病率上升，严重时甚至导致死亡，如2003年的欧洲高温

热浪导致约4万人死亡^[34]。除了白天热浪（白天高温型）天气的严重危害，夜间热浪（夜间高温型）对人体健康同样可以带来严重影响^[35]。当白天累积的热量夜间无法释放，可能引发白天-夜间复合型热浪事件，这种复合热浪阻碍了人体从日间高温天气影响的恢复，可能进一步升高心血管疾病甚至死亡风险，对老人和儿童的影响更大^[36]。2022年夏季包括四川、重庆在内的多个地区出现了热射病病例，极端高温热浪严重威胁人民的生命健康。

3.4 能源安全

与传统化石燃料相比，水力发电可再生，且可以显著减少温室气体排放，是世界公认的清洁能源，但是水电生产受到气候变化及极端事件的显著影响^[37]。有调节水库的水电站在丰水期蓄水、枯水期放水，从而调节河川径流的水量用于水力发电，应对水旱灾害。而对于无调节水库的径流式水电站，当汛期遭遇严重干旱时，水力发电量会严重削减。因此，当极端干旱与高温热浪同时发生时，一方面来水减少，导致水电产能下降，电力供给受到严重冲击，而另一方面高温热浪导致用电需求激增，使电力供需严重失衡。这些影响呈现并发、链式发生的特点，对电力能源供应带来一系列负面影响。

四川省是我国重要水电能源基地，是“西电东送”的重要输出端。四川省的电力结构中，水电占比达80%，此外，四川省水电站很大一部分是径流式水电站，一旦遭遇持续干旱，这类水电站发电能力迅速下降。由于2022年夏季严重干旱少雨，四川省

各江河流域来水较往年同期偏枯,流域上游来水量显著减少(减少了约 50%)^[33],水力发电能力大幅下降,同时,在持续高温天气条件下,空调等居民用电量剧增。在这种复合高温干旱事件严重影响下,四川省电力供需紧张形势加剧,2022 年 8 月中旬四川省紧急下发限电通知。

3.5 森林火灾

森林火灾可严重损害森林生态系统的结构与功能,导致森林生物量下降、生产力减弱,对社会经济造成巨大损失,甚至导致人员伤亡。森林火灾的发生一般需要具备 3 个条件,即可燃物(树木、草灌等植物)、火险天气及火源。持续干旱可能降低可燃物的含水率,使林火蔓延速度加快,同时,气温、相对湿度以及风速等均对火灾有重要影响,如气温升高使可燃物中水分蒸发速度变快,空气湿度小使可燃物水分蒸发量大,从而导致火灾发生风险升高^[38]。因此,当高温和干旱极端事件同时发生时,火灾发生的风险更高^[12,39-40]。

重庆市域地形相对复杂,主要以山地和丘陵为主,森林植被资源丰富,植被类型以亚热带常绿阔叶林为主,森林与居民点交错分布,森林火灾的隐患较大^[41]。2022 年夏季重庆地区持续高温干旱对林区植被的炙烤导致其异常干燥,极易燃烧的可燃物(枯死植被等)大量堆积,同时高温、干燥及较低的相对湿度均为高火险天气条件,有利于火灾蔓延^[12]。持续多日的高温干旱天气为该地区森林火灾提供了天气条件,2022 年 8 月 18—26 日重庆多地发生森林火灾,转移群众上千人。

4 应对复合高温干旱事件的措施建议

4.1 加深对复合高温干旱发生机制认识

复合高温干旱事件与环流异常、土壤湿度-高温反馈机制以及海气模态关系的研究已经取得了进步,但是由于高温、干旱事件的驱动因素及相互作用较为复杂,目前不同时空尺度复合高温干旱事件的发生、发展以及结束的物理机制仍需要进一步研究^[4]。同时,与复合高温干旱事件有关的一些物理过程在当前气候模式或者陆面模型中尚难以准确模拟。如土壤湿度-高温热浪的反馈对复合高温干旱事件的影响已经得到了越来越多的关注,但是由于分辨率或者参数化方案等的限制,陆面对降水和温度(及相关极端事件)的影响在模式中仍然难以准确模拟^[25,42]。因此,未来有必要加强对不同时空尺度复合高温干旱事件的发生机制研究,改进气候模式和陆面模型,为准确预测预警提供理论和技术基础。

4.2 加强高温干旱联合监测与预测

干旱预测可为提前了解干旱情势的发展提供有效信息,从而指导水资源调配,为水资源管理提供决策依据。2022 年长江流域极端干旱事件的显著特点是干旱叠加高温,虽然干旱预测可以提供水资源的供给信息,但是无法提供高温导致的水资源需求以及电力需求信息,因此,独立的干旱或者高温预测很可能低估复合高温干旱事件一系列负面影响。未来需要建立干旱和高温的联合监测预警体系^[20],提前对水、电的未来供需信息进行预测,尽早做好防范措施。在气候变暖的背景下,未来高温热浪和干旱事件的发生可能更为频繁^[4],二者叠加的极端天气气候风险也会大大增加,因此需要加强对干旱和高温联合监测预警技术的研究,以协助管理部门制定应急预案,做好资源调配工作。

4.3 加强高温干旱影响评估

高温干旱可直接导致水资源减少、农业减产等,其影响可能进一步传递到水力发电等其他领域(也称为级联效应)。如干旱期间河道流量减少,而高温热浪期间常伴随着水温升高,这种低流量-高温事件同样可能对水电站设备的冷却及水生生物生态环境造成负面影响^[28,43]。虽然目前高温和干旱事件对水资源以及水力发电的影响已经得到了重视,但是对复合高温事件影响的定量化研究相对较少^[4]。与单一极端事件的影响不同的是,复合天气气候极端事件的影响往往涉及多个变量及过程,因此,未来需要进一步加强有关复合高温干旱事件对不同产业部门影响(包括直接影响以及链式影响)的研究,以提升各部门的防灾减灾能力。

4.4 优化联合调度措施

在应对复合极端干旱高温事件时,流域水库群的联合调度显得尤为重要。水库群联合调度可以对流域内具有水力联系的多个水库(或者湖泊)进行统一调度,考虑单库之间的相互影响,提高水资源时空分布的调节能力,实现水资源优化配置^[44-45]。在旱情严重的年份,通过水库群联合调度可缓解极端干旱缺水与水资源供需的矛盾,提升水库群抗旱减灾效果。如果旱情进一步持续、扩展并加重,形成全流域或者多地区的复合干旱情势,水库群联合调度可能存在一定的局限,这需要采取其他措施。

历史罕见的复合高温干旱事件是导致 2022 年夏季川渝电力紧缺的重要因素^[12],该事件表明单一能源形式受到极端事件影响,不确定因素的影响大。在全球变暖背景下,高温热浪以及干旱等极端天气气候事件可能成为新常态,这对于水力发电调度以及电力供需平衡将带来巨大挑战。因此,在整合常

规能源发电业务应对极端事件的同时,还需要探索风电、光伏等新能源的高效利用及综合利用的途径,充分利用风、光、水等可再生能源的互补特性,推动其一体化协同发展并实现联合调度(如高温干旱期间光伏多发电,水能少发电),以应对极端事件情况下水电生产能力大幅下降的极端情况^[46-48]。

4.5 加强气候变化下的适应性措施研究

我国最新《国家适应气候变化战略 2035》报告指出,极端高温、干旱、森林大火、强降雨等极端天气气候事件及灾害的频发与多发,凸显了适应气候变化及极端事件的重要性与紧迫性,加强气候变化监测预警(包括复合型灾害预测预警技术)和风险管理,是提高气候风险防范和抵御能力的重要举措。多种致灾因子可能同时发生,加剧了对农业、生态、健康等部门的影响;而不同的气候(或者非气候)风险可能相互作用,导致影响或者风险在不同部门及区域间传递(级联风险)^[49]。因此,未来需要加强复合高温干旱事件的风险识别、适应性措施制定以及适应效果评估等方面的研究。这首先需要加强复合高温干旱事件对水利、农业、能源等部门的风险识别与评估,其次,需要制定一系列的适应性措施(如农业种植结构调整、灌溉等),并评估不同适应性措施的效果^[11]。研究气候变化下复合高温干旱事件的适应性措施,对强化适应气候变化的能力、增强我国社会经济系统的气候韧性具有重要意义。

5 结 语

2022 年夏季长江流域高温和干旱事件的显著特点是高温与干旱叠加,是长江流域 1979 年以来覆盖面积最广的复合高温干旱事件。气象干旱伴随着降水减少,并发的高温事件导致土壤、水体以及植被的蒸散发增加,最终导致河流及湖库的水分减少,一方面影响城乡居民用水、农业用水以及灌溉用水,另一方面使水力发电量大幅削减,与高温引发的用电需求增多相叠加,最终导致电力供需失衡,影响社会生产生活。同时复合高温干旱事件影响土壤含水量及植被干燥度,加剧了发生山火的风险。未来需要加强复合高温干旱事件发生机制的研究,建立高温和干旱联合监测及预警体系,加强复合高温干旱事件对不同部门的影响评估,优化水库群联合调水及水-风-光联合发电的调度措施,加强气候变化下的适应性措施研究。本文采用的 ERA5 再分析数据集在分析极端事件方面可能存在一定的误差,这也是本文的不足之处。未来可以采用我国一些高质量数据集(如中国气象局陆面同化系统或者中

国全球大气/陆面再分析系统, www.nmic.cn/data) 做进一步分析。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 余荣, 翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示 [J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 645-649. (YU Rong, ZHAI Panmao. Advances in scientific understanding on compound extreme events [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 645-649. (in Chinese))
- [3] RAYMOND C, HORTON R M, ZSCHEISCHLER J, et al. Understanding and managing connected extreme events [J]. Nature Climate Change, 2020, 10: 611-621.
- [4] HAO Z, HAO F, XIA Y, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts [J]. Earth-Science Reviews, 2022, 235: 104241.
- [5] ZSCHEISCHLER J, MARTIUS O, WESTRA S, et al. A typology of compound weather and climate events [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 333-347.
- [6] FENG S, HAO Z, ZHANG X, et al. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields [J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 1228-1234.
- [7] 程玉佳, 张珂, 晁丽君. 青藏高原复合干热事件及其对植被的影响 [J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 52-58. (CHENG Yujia, ZHANG Ke, CHAO Lijun. Compound dry-hot events on Qinghai-Tibet Plateau and their effects on vegetation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 52-58. (in Chinese))
- [8] RIBEIRO A F S, RUSSO A, GOUVEIA C M, et al. Risk of crop failure due to compound dry and hot extremes estimated with nested copulas [J]. Biogeosciences, 2020, 17(19): 4815-4830.
- [9] CHEN L, CHEN X, CHENG L, et al. Compound hot droughts over China: identification, risk patterns and variations [J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 210-219.
- [10] YU R, ZHAI P. Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern China [J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 30: 100295.
- [11] HAO Z. Compound events and associated impacts in China [J]. iScience, 2022, 25(8): 104689.
- [12] HAO Z, CHEN Y, FENG S, et al. The 2022 Sichuan-Chongqing spatio-temporally compound extremes: a bitter taste of novel hazards [J]. Science Bulletin, 2023, 68(13): 1337-1339.
- [13] 张强. 科学解读“2022 年长江流域重大干旱” [J]. 干旱气象, 2022, 40(4): 545-548. (ZHANG Qiang. Scientific interpretation of severe drought in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40

- (4):545-548. (in Chinese)).
- [14] 李忆平,张金玉,岳平,等. 2022 年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究[J]. 干旱气象,2022,40(5): 733-747. (LI Yiping, ZHANG Jinyu, YUE Ping, et al. Study on characteristics of severe drought event over Yangtze River Basin in summer of 2022 and its causes [J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(5): 733-747. (in Chinese)).
- [15] 郝立生,马宁,何丽烨. 2022 年长江中下游夏季异常干旱高温事件之环流异常特征[J]. 干旱气象,2022,40(5): 721-732. (HAO Lisheng, MANing, HE Liye. Circulation anomalies characteristics of the abnormal drought and high temperature event in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer of 2022 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(5): 721-732. (in Chinese)).
- [16] 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等. ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析[J]. 干旱区地理,2022,45(1): 66-79. (LIU Tingting, ZHU Xiufang, GUO Rui, et al. Applicability of ERA5 reanalysis of precipitation data in China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 66-79. (in Chinese)).
- [17] 姜雨彤,侯爱中,郝增超,等. 长江流域 2022 年高温干旱事件演变及历史对比[J]. 水力发电学报,2023, 42(8): 1-9. (JIANG Yutong, HOU Aizhong, HAO Zengchao, et al. Evolution and historical comparison of hot droughts in Yangtze River basin in 2022 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(8): 1-9. (in Chinese)).
- [18] 石朋,詹慧婕,瞿思敏,等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护,2022,38(3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 80-86. (in Chinese)).
- [19] 栗晓玲,梁晓萱,吴海江,等. 表征生态状况的综合干旱指数构建及干旱风险分析[J]. 水资源保护,2023, 39(2): 50-58. (SU Xiaoling, LIANG Xiaoxuan, WU Haijing, et al. Construction of comprehensive drought index representing ecological condition and drought risk analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 50-58. (in Chinese)).
- [20] HAO Zengchao, HAO Fanghua, XIA Youlong, et al. A monitoring and prediction system for compound dry and hot events[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(11): 114034.
- [21] 夏军,陈进,余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报,2022, 53(10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese)).
- [22] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护,2022, 39(2): 70-77. (JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatio-temporal changes in compound hot-dry events in the Yangtze River and Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022: 70-77. (in Chinese)).
- [23] 邹旭恺,高荣,陈鲜艳,等. 2022 年长江流域夏伏旱监测评估[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(10): 12-16. (ZOU Xukai, GAO Rong, CHEN Xianyan, et al. Monitoring and assessment of summer drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(10): 12-16. (in Chinese)).
- [24] 冯宝飞,邱辉,纪国良. 2022 年夏季长江流域气象干旱特征及成因初探[J]. 人民长江, 2022, 53(23): 6-15. (FENG Baohui, QIU Hui, JI Guoliang. Characteristics and causes of meteorological drought over Changjiang River Basin in summer of 2022[J]. Yangtze River, 2022, 53(23): 6-15. (in Chinese)).
- [25] MIRALLES D G, GENTINE P, SENEVIRATNE S I, et al. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges[J]. Annals of The New York Academy Of Sciences, 2019, 1436(1): 19-35.
- [26] 曹永强,李可欣,任博,等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 28-36. (in Chinese)).
- [27] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese)).
- [28] VAN VLIET M T H, SHEFFIELD J, WIBERG D, et al. Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(12): 124021.
- [29] LESK C, ANDERSON W. Decadal variability modulates trends in concurrent heat and drought over global croplands[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(5): 055024.
- [30] 赵鸿,王润元,尚艳,等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 1-12. (ZHAO Hong, WANG Runyuan, SHANG Yan, et al. Progress and perspectives in studies on responses and thresholds of major food crops to high

- temperature and drought stress [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1):1-12. (in Chinese))
- [31] LESK C, COFFEL E, WINTER J, et al. Stronger temperature-moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields[J]. Nature Food, 2021, 2(9):683-691.
- [32] 夏智宏,刘敏,秦鹏程,等. 2022 年长江流域高温干旱过程及其影响评估[J]. 人民长江, 2023, 54(2):21-28. (XIA Zhihong, LIU Min, QIN Pengcheng, et al. Development process of high temperature and drought events over Yangtze River Basin in 2022 and assessment on its influences [J]. Yangtze River, 2023, 54(2):21-28. (in Chinese))
- [33] MA M, QU Y, LYU J, et al. The 2022 extreme drought in the Yangtze River Basin: characteristics, causes and response strategies[J]. River, 2022, 1(2):162-171.
- [34] GARCÍA-HERRERA R, DÍAZ J, TRIGO R M, et al. A review of the european summer heat wave of 2003 [J]. Critical Reviews in Environmental Science And Technology, 2010, 40(4):267-306.
- [35] HE Cheng, KIM H, HASHIZUME M, et al. The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: a modelling study [J]. The Lancet Planetary Health, 2022, 6(8):e648-e657.
- [36] WANG Jun, CHEN Yang, TETT S F B, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes [J]. Nature Communications, 2020, 11(1):528.
- [37] QIN Pengcheng, XU Hongmei, LIU Min, et al. Assessing concurrent effects of climate change on hydropower supply, electricity demand, and greenhouse gas emissions in the upper Yangtze River Basin of China [J]. Applied Energy, 2020, 279:115694.
- [38] 徐明超, 马文婷. 干旱气候因子与森林火灾[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3):603-608. (XU Mingchao, MA Wenting. Relationship between arid climatic factors and forest fires [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3):603-608. (in Chinese))
- [39] RIBEIRO A F S, BRANDO P M, SANTOS L, et al. A compound event-oriented framework to tropical fire risk assessment in a changing climate [J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(6):065015.
- [40] SUTANTO S J, VITOLO C, DI NAPOLI C, et al. Heatwaves, droughts, and fires: exploring compound and cascading dry hazards at the pan-european scale [J]. Environment International, 2020, 134:105276.
- [41] 郑忠, 高阳华, 杨庆媛, 等. 西南山地区域森林火险综合预报模型研究:以重庆市为例[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1):152-161. (ZHENG Zhong, GAO Yanghua, YANG Qingyuan, et al. Research on the construction of composite risk prediction model for forest fire in the mountainous area of southwestern China: talking Chongqing City as an example [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1):152-161. (in Chinese))
- [42] SILLMANN J, THORARINSDOTTIR T, KEENLYSIDE N, et al. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: challenges and opportunities [J]. Weather and Climate Extremes, 2017, 18:65-74.
- [43] LIU Zhiyong, CHEN Xiaohong, LIU Feng, et al. Joint dependence between river water temperature, air temperature, and discharge in the Yangtze River: the role of the Three Gorges Dam [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(21):11938-11951.
- [44] 许继军, 陈进, 尹正杰, 等. 长江流域梯级水库群联合调度关键问题研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(12):48-52. (XU Jijun, CHEN Jin, YIN Zhengjie, et al. Key issues in the joint operation of large cascade reservoirs in Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(12):48-52. (in Chinese))
- [45] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3):233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaoguan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3):233-240. (in Chinese))
- [46] 黄显峰, 颜山凯, 李大成, 等. 对水电效益影响最小的水光互补运行方式研究[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6):15-20. (HUANG Xianfeng, YAN Shankai, LI Dacheng, et al. Research on hydro-photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):15-20. (in Chinese))
- [47] 申建建, 王月, 程春田, 等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11):3871-3885. (SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11):3871-3885. (in Chinese))
- [48] HÖLTINGER S, MIKOVITS C, SCHMIDT J, et al. The impact of climatic extreme events on the feasibility of fully renewable power systems: a case study for Sweden [J]. Energy, 2019, 178:695-713.
- [49] 王蕾, 张百超, 石英, 等. IPCC AR6 报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4):389-394. (WANG Lei, ZHANG Baichao, SHI Ying, et al. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change [J]. Climate Change Research, 2022, 18(4):389-394. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-09 编辑:彭桃英)